

中远程空空导弹协同中制导交接律研究

刁兴华¹, 方洋旺², 陈鹏¹, 轩永波³, 臧旭⁴, 王鹏⁵

(1. 中国人民解放军94676部队, 上海 200178; 2. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038;
3. 中国人民解放军93787部队, 北京 100076; 4. 解放军驻沈阳飞机工业有限公司军事代表室, 沈阳 110850;
5. 中国人民解放军93801部队, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 不同类型空中平台协同对导弹进行中段制导时, 中制导权在移交过程中容易引起导弹过载的非正常突变, 这主要是由目标信息及制导律切换引起的。基于将突变转化为渐变, 从而减小过载变化幅度的思路, 采用变权系数方法, 提出目标信息交接律及制导律交接律算法。目标信息交接律是给出交接平台目标信息加权后的“虚拟目标”信息, 制导律交接律则给出交接前后的加权制导律; 两种交接律都是逐渐改变两加权项的权系数比重, 直到一项权系数为0, 另一项为1, 实现加权项之间的切换; 同时, 为确保交接段导弹过载平滑变化, 需满足交接段导弹加速度导数存在。最后通过仿真验证了该交接方法的有效性。

关键词: 中远程导弹; 协同制导; 制导权移交; 信息突变; 变权系数

中图分类号: TN956; O221.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)11-0035-07

Cooperative Midcourse Guidance Handover Law for Mid-Long-Range Air-to-Air Missile

DIAO Xing-hua¹, FANG Yang-wang², CHEN Peng¹, XUAN Yong-bo³, ZANG Xu⁴, WANG Peng⁵
(1. No. 94676 Unit of PLA, Shanghai 200178, China; 2. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 3. No. 93787 Unit of PLA, Beijing 100076, China; 4. Military Representative Office of PAL in Shenyang Aircraft Industry Limited Company, Shenyang 110850, China; 5. No. 93801 Unit of PLA, Xianyang 712000, China)

Abstract: In midcourse guidance of missile by cooperation of different kinds of aircrafts, abnormal abrupt change of missile overload is easily emerged in the process of guidance handover, which is mainly resulted from the switching of target information and guidance law. Based on the idea of converting the “abrupt change” to a “gradual change”, thus reducing the variable extent of overload, algorithms for the handover laws of target information and guidance law are proposed by adopting the variable weight coefficient method. Of which, the handover law of target information gives the “virtual target” information after weighting on the target information from handover aircrafts, while the handover law of guidance law gives the weighted guidance law of that before and after handover. Both the handover laws gradually change the weight coefficients of two weighted terms, until one weight coefficient is 0, and the other is 1, thus to realize the switching between weighted terms. To ensure the smooth transform of missile overload in the handover phase, it should be satisfied that the derivative of missile acceleration exists in the handover phase. Finally, simulations are carried out to demonstrate the effectiveness of the proposed handover method.

Key words: mid-long-range air-to-air missile; cooperative guidance; guidance handover; information break; variable weight coefficient

0 引言

随着战术数据链技术的发展, 空战中传统本机制

导攻击模式发展为它机制导攻击模式, 即通过协同制导^[1-3], 发射平台将导弹的中制导权移交给另一架新的制导平台, 制导权移交成功后, 导弹继续由新的平台进行中制导, 原制导平台退出。本文中协同制导指的是非导弹平台协同进行导弹的中段制导。

由于中制导交接前后目标信息来源不同, 信息质

量也有差异,信息质量决定采用何种导引规律^[4]。在目标信息不完整,精度低的情况下,适合采用对目标信息需求少的导引律,如比例导引律;如果目标信息完整且精度较高,则采用对目标信息要求较高的导引律,如扩展比例导引律。

对于采用最优导引律的中远程空空导弹来说,在中制导权交接时,如果将目标信息直接交接,尤其在精度差异较大时,同时伴随制导律的切换,会造成导弹过载突变^[5],影响弹道稳定,甚至导致交班不成功。为确保制导指令的平稳过渡,需设计空空导弹中制导交接律。

目前,国外能检索到关于非导弹平台协同制导的公开文献很少。国内的研究也处于探索阶段,文献[6-7]研究了舰空导弹接力切换式制导交接过程并提出实现方案;文献[8]对协同制导交接区和协同制导航路规划进行了研究;文献[1,9]研究了空战中的协同制导决策问题,提出制导优势的概念及算法,以上文献都没有涉及制导交接过程中信息突变的问题;文献[10]通过引进平滑因子,设计了简单的舰空导弹多平台接力制导目标信息交接律,但该交接律在交接开始及结束时刻的导弹过载不平滑。

本文重点对不同制导体制下,中制导权交接时导弹过载突变的问题进行研究,将导弹过载突变分解为目标信息差异引起的过载突变及导引律切换引起的过载突变,提出了中制导移交的流程及交接律。

1 问题的描述

绝大多数空空超视距拦截导弹的中制导一般采用惯性制导加无线电指令修正方式,导弹自身的运动参数由惯导系统提供,目标信息则以无线电指令的方式由载机发送给导弹^[11]。

中制导交接的主要内容是制导信息的切换,影响导弹过载的因素主要为目标信息及制导律。交接前后制导信息的差异主要表现为如下几种。

1) 新平台与原平台传感器类型相同,制导交接前后采用相同的制导模式。交接前后不需要变换制导律,但由于系统误差使得目标信息精度不同^[12],导致目标信息的突变。中制导交接主要指目标信息的切换。

2) 新平台与原平台传感器类型不同,制导交接前后需采用不同的制导模式^[13-14]。如原平台采用被动雷达制导模式,新平台采用主动雷达制导模式,交接前后的目标信息特性不同,为满足制导控制要求需采用不同的制导律。中制导交接不仅包含目标信息的切换,还包含制导律的切换。

本文主要研究第2)类问题。中制导交接问题可描述如下。

当导弹由第*i*个平台的制导区间飞向第*j*个平台的制导区间时,导弹完成制导权的交接。

设导弹自身信息的更新周期为 Δt ,运动信息为 $M(t)$,第*i*个制导平台提供的目标信息为 $T_i(t)$,导弹采用制导律 G_i ,过载为 $n_i(t) = G_i(T_i(t), M(t), \Delta t)$;第*j*个协同制导平台提供的目标信息为 $T_j(t)$,导弹采用制导律 G_j ,过载 $n_j(t) = G_j(T_j(t), M(t), \Delta t)$ 。

假定在时刻 t_k 由平台*i*制导,经过一个信息周期 Δt 后,即在时刻 $t_{k+1}(t_{k+1} = t_k + \Delta t)$,制导信息切换到平台*j*。

在周期 Δt 内,导弹预测目标进行匀速直线运动,则交接时目标信息增量为

$$\Delta T = T_j(t_{k+1}) - T_i'(t_{k+1}) = \Delta T_{\text{maneuver}} + \Delta T_{\text{diff}} \quad (1)$$

式中: $T_i'(t_{k+1})$ 为由 $T_i(t)$ 预测的 t_{k+1} 时刻的目标信息; $\Delta T_{\text{maneuver}}$ 为目标机动引起的目标信息增量; ΔT_{diff} 为原平台与新平台间获取的目标信息精度差。

设 $n_i'(t_{k+1})$ 为 t_{k+1} 时刻由预测信息 $T_i'(t_{k+1})$ 计算的导弹过载,则交接时导弹的额外过载增量 Δn 为

$$\begin{aligned} \Delta n = n_j(t_{k+1}) - n_i'(t_{k+1}) = & G_j(T_j(t_{k+1}), M(t_{k+1}), \\ & \Delta t) - G_i(T_i'(t_{k+1}), M(t_{k+1}), \Delta t) = G_j(T_i'(t_{k+1}) + \\ & \Delta T, M(t_{k+1}), \Delta t) - G_i(T_i'(t_{k+1}), M(t_{k+1}), \Delta t) = \\ & G_j(T_i'(t_{k+1}) + \Delta T_{\text{maneuver}} + \Delta T_{\text{diff}}, M(t_{k+1}), \Delta t) - \\ & G_i(T_i'(t_{k+1}), M(t_{k+1}), \Delta t) \quad (2) \end{aligned}$$

由式(2)可知,交接瞬时的额外过载增量主要有3部分:1) 目标机动引起的过载增量,即使制导权不移交,这一部分也是存在的;2) 目标信息精度差引起的过载增量;3) 制导律的差异造成的过载增量。1) 取决于目标的运动状况,2) 和3) 是制导权在不同平台间移交时不可避免的。

设计制导权交接律的目的就是尽量减小上述两部分过载对导弹过载的影响,制导权交接主要包含目标信息的交接和制导律的交接。

2 中制导交接分析

交接期间的目标信息及制导律的差异是实际存在的。如果在一个采样周期内完成交接,则造成导弹瞬时过载突变,影响弹道稳定;如果分若干周期逐步完成交接,则分担在交接期间内的每个瞬时过载相对较小。制导权的交接过程,就是将差异信息由突变转为渐变的过程。

2.1 中制导权交接方法

目标信息的交接在交接平台间进行。可采用“虚拟目标”的方法将制导信息从一个平台转移到另一个平台:交接过程中,原平台通过在自身探测目标信息的基础上逐步增加两平台间的精度误差信息,形成一个

虚拟目标,该虚拟目标逐步接近接替制导平台探测的目标,直到重合,如图 1 所示。

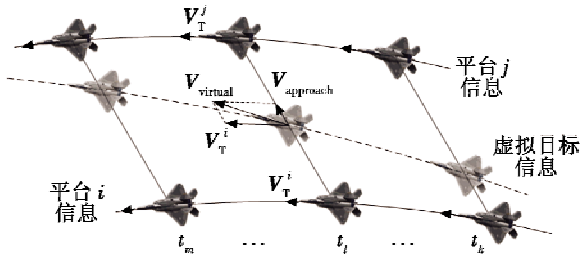


图 1 虚拟目标轨迹

Fig.1 Virtual target track

虚拟目标运动 M_{virtual} 是平台信息目标运动 M_{true} 与接近运动 M_{approach} 的合成,其对时间的导数分别为虚拟目标的速度 V_{virtual} 、平台 i 探测的目标运动速度 V_T^i 和接近速度 V_{approach} ,即

$$V_{\text{virtual}} = V_T^i + V_{\text{approach}} \quad (3)$$

因此,目标信息交接的关键是如何构造 M_{approach} 的运动方程。

制导律的交接一般由导弹制导控制系统完成^[4]。交接前导弹的导引律为 G_i ,交接后导引律为 G_j ,交接期间采用虚拟目标的运动信息 M_{virtual} ,则不同导引律输出的过载的差异 Δn 为

$$\Delta n = n_j - n_i = G_j(M_{\text{virtual}}) - G_i(M_{\text{virtual}}) \quad (4)$$

式中: $n_j = G_j(M_{\text{virtual}})$ 为导引律 G_j 输出的过载; $n_i = G_i(M_{\text{virtual}})$ 为导引律 G_i 输出的过载。采用与目标信息交接类似的方法,在 n_i 上逐步增加过载差异信息,直到 n_i 被 n_j 完全代替。制导律交接的关键是如何构造 Δn 的变化方程。

目标信息的交接与制导律的交接同步进行,交接完成时,目标信息采用新平台的目标信息,同时制导律也切换到新制导律。

2.2 制导权交接流程

2.2.1 交接准备

1) 假设平台 i 选定平台 j 作为接替制导的平台,双方通过数据链交换探测到的目标信息。平台 i 通过对连续若干个采样周期的数据进行对比计算,得到两平台探测目标信息的精度差 L_{break} 。导弹制导控制系统确定在新的目标信息条件下导弹平台需采用的制导律 G_j 。

设平台 i 获得的目标位置矢量为 $L_i(t)$;平台 j 得到的目标位置矢量为 $L_j(t)$,则有

$$\begin{cases} L_j(t) - L_i(t) = L_{\text{break}} \\ L'_{\text{break}} = V_{\text{break}} \end{cases} \quad (5)$$

式中, V_{break} 为目标速度精度差。

机载雷达对目标的测量数据中包含两种误差:一种是随机误差,可利用滤波等方法使误差的方差在统

计意义下最小化,在一定程度上克服随机误差;另一种是系统误差,系统误差是复杂、慢变、非随机变化的,在相对较长一段时间内可以看作未知的“恒定值”^[12]。为研究方便,本文不考虑随机误差。

$$\begin{cases} L_{\text{break}} = \text{const} \\ V_{\text{break}} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

2) 制定交接方案。主要包括以下两点。

① 交接时间 T_k 。平台 i 确定在随后的时间区间 $[0, MT]$ 内完成制导信息的过渡, T 为制导指令发送周期, M 为实施中制导权移交的指令周期数, $T_k = MT$ 。

② 交接律。交接律是指制导信息的渐变规律,这里引入目标信息交接律 $\lambda(t)$ 及制导律交接律 $\eta(t)$ 两个参数。

设虚拟目标位置矢量为 $L(t)$,则有

$$L(t) = L_i(t) + \lambda(t)L_{\text{break}} \quad (7)$$

式中, $L_i(t)$ 为平台 i 探测的目标位置信息。

交接段的制导律为 G_k ,则过载 $n(t)$ 为

$$n(t) = n_i(t) + \eta(t)(n_j(t) - n_i(t)) \quad (8)$$

2.2.2 交接实施

平台 i 根据制定的交接方案,在指令发送周期内,将自身探测的目标机动引起的距离变化信息 ΔL_{normal} 加上目标位置精度差增量 $\Delta L_{\text{break}}^i$,在基准坐标系 $OXYZ$ 3 个坐标轴上的投影,进行编码,形成无线电指令发送给导弹,导弹计算机进行修正计算^[11,15],即

$$\Delta L = \Delta L_{\text{normal}} + \Delta L_{\text{break}}^i \quad (9)$$

由于矢量的变化同各坐标轴上分量变化规律相同,为研究方便,下文将以标量的形式进行讨论。

在指令发送的间隙,导弹按平台 i 提供的虚拟目标的位置及速度对虚拟目标的运动进行预测,如果目标机动,与导弹预测的虚拟目标位置产生偏差,则由下一周期的制导指令对导弹预测的虚拟目标运动状态进行修正^[11,15]。

导弹制导控制系统在交接开始实施后,根据预定的制导律交接律 $\eta(t)$,确定交接段制导律 G_k ,并按虚拟目标信息输出过载。

2.2.3 交接结束

经过 M 个指令周期,平台 i 发送给导弹的制导指令已与平台 j 的相同,导弹制导控制系统也将导引律切换到 G_j 。此时,平台 i 通知平台 j 从下一个指令发送周期开始,导弹直接接受来自平台 j 的制导指令。当平台 j 开始向导弹发送制导指令,目标信息交接结束。

2.3 交接律算法

2.3.1 目标信息交接律

本文给出一种求 $\lambda(t)$ 的方法。根据式(7),得

$$L(t) = L_i(t) + \lambda(t)(L_j(t) - L_i(t)) =$$

$$(1 - \lambda(t))L_i(t) + \lambda(t)L_j(t) \quad (10)$$

$$L(t) = L_i(t) + \lambda(t)L_{\text{break}} = L_j(t) - (1 - \lambda(t))L_{\text{break}} \quad (11)$$

式中, $\lambda(t)$ 为待定函数。

若要求过载平滑过渡, 需满足过载导数连续, 即

$$\begin{cases} L(t_0) = L_i(t_0), L(t_0 + T_h) = L_j(t_0 + T_h) \\ L'(t_0) = L'_i(t_0), L'(t_0 + T_h) = L'_j(t_0 + T_h) \\ L''(t_0) = L''_i(t_0), L''(t_0 + T_h) = L''_j(t_0 + T_h) \\ L'''(t_0) = L'''_i(t_0), L'''(t_0 + T_h) = L'''_j(t_0 + T_h) \end{cases} \quad (12)$$

式中: 若 $t_0 = 0$, 则交接段为 $[0, T_h]$; 若 $t_0 \neq 0$, 则令 $\bar{L}_i(t) = L_i(t + t_0)$, $\bar{L}(t) = L(t + t_0)$, $\bar{L}_j(t) = L_j(t + t_0)$, 则可将 $L_i(t)$, $L(t)$ 和 $L_j(t)$ 在 $[t_0, t_0 + T_h]$ 区间内的交接转换为 $\bar{L}_i(t)$, $\bar{L}(t)$ 和 $\bar{L}_j(t)$ 在 $[0, T_h]$ 区间内的交接。

分别对式(7)求一、二、三阶导, 得

$$\begin{cases} L'(t) = L'_i(t) + \lambda'(t)L_{\text{break}} \\ L''(t) = L''_i(t) + \lambda''(t)L_{\text{break}} \\ L'''(t) = L'''_i(t) + \lambda'''(t)L_{\text{break}} \end{cases} \quad (13)$$

由

$$\begin{cases} L(0) = L_i(0) + \lambda(0)L_{\text{break}} = L_i(0) \\ L'(0) = L'_i(0) + \lambda'(0)L_{\text{break}} = L'_i(0) \\ L''(0) = L''_i(0) + \lambda''(0)L_{\text{break}} = L''_i(0) \\ L'''(0) = L'''_i(0) + \lambda'''(0)L_{\text{break}} = L'''_i(0) \end{cases} \quad (14)$$

得

$$\begin{cases} \lambda(0) = 0 \\ \lambda'(0) = 0 \\ \lambda''(0) = 0 \\ \lambda'''(0) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

同理, 分别对式(11)求一、二、三阶导并结合式(12), 可得

$$\begin{cases} \lambda(T_h) = 1 \\ \lambda'(T_h) = 0 \\ \lambda''(T_h) = 0 \\ \lambda'''(T_h) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

由于 $\lambda(t)$ 可以为任何函数形式, 不妨设

$$\lambda(t) = C_1 \cos \frac{2\pi}{T}t + C_2 \sin \frac{2\pi}{T}t + C_3 \cos \frac{3\pi}{2T}t + C_4 \sin \frac{3\pi}{2T}t + C_5 \cos \frac{\pi}{T}t + C_6 \sin \frac{\pi}{T}t + C_7 \cos \frac{\pi}{2T}t + C_8 \sin \frac{\pi}{2T}t \quad (17)$$

对式(17)求一、二、三阶导, 并将式(15)、式(16)代入, 可得

$$\begin{cases} C_1 + C_3 + C_5 + C_7 = 0 \\ 4C_2 + 3C_4 + 2C_6 + C_8 = 0 \\ 16C_1 + 9C_3 + 4C_5 + C_7 = 0 \\ 64C_2 + 27C_4 + 8C_6 + C_8 = 0 \end{cases}, \begin{cases} C_1 - C_4 - C_5 + C_8 = 0 \\ 4C_2 + 3C_3 + 2C_6 - C_7 = 0 \\ 16C_1 - 9C_4 - 4C_5 + C_8 = 0 \\ 64C_2 + 27C_3 - 8C_6 - C_7 = 0 \end{cases} \quad (18)$$

对式(18)求解, 得 $C_1 = 0.0294$, $C_2 = -1.0$, $C_3 = 2.3824$, $C_4 = 2.6176$, $C_5 = -6.5$, $C_6 = -0.4706$, $C_7 = 4.0882$, $C_8 = -2.9118$ 。即

$$\lambda(t) = 0.0294 \cos \frac{2\pi}{T}t - 0.1 \sin \frac{2\pi}{T}t + 2.3824 \cos \frac{3\pi}{2T}t + 2.6176 \sin \frac{3\pi}{2T}t - 6.5 \cos \frac{\pi}{T}t - 0.4706 \sin \frac{\pi}{T}t + 4.0882 \cos \frac{\pi}{2T}t - 2.9118 \sin \frac{\pi}{2T}t \quad (19)$$

2.3.2 制导律交接律设计

由上一节的分析可知, 制导律交接就是求式(8)中的 $\eta(t)$ 。根据式(8), 得

$$n(t) = (1 - \eta(t))n_i(t) + \eta(t)n_j(t) \quad (20)$$

$\eta(t)$ 为待定函数, 若要过载平滑过渡, 需满足

$$\begin{cases} n(t_0) = n_i(t_0), n(t_0 + T_h) = n_j(t_0 + T_h) \\ n'(t_0) = n'_i(t_0), n'(t_0 + T_h) = n'_j(t_0 + T_h) \end{cases} \quad (21)$$

由上节分析, 若 $t_0 \neq 0$, 可将 $n_i(t)$, $n(t)$ 和 $n_j(t)$ 在 $[t_0, t_0 + T_h]$ 区间内的交接转换为 $\bar{n}_i(t)$, $\bar{n}(t)$ 和 $\bar{n}_j(t)$ 在 $[0, T_h]$ 区间内的交接。

对式(8)求导, 得

$$n'(t) = n'_i(t) + \eta'(t)(n_j(t) - n_i(t)) + \eta(t)(n'_j(t) - n'_i(t)) \quad (22)$$

由式(21)可知

$$\begin{cases} n(0) = n_i(0) + \eta(0)(n_j(0) - n_i(0)) = n_i(0) \\ n(T_h) = n_i(T_h) + \eta(T_h)(n_j(T_h) - n_i(T_h)) = n_j(T_h) \\ n'(0) = n'_i(0) + \eta'(0)(n_j(0) - n_i(0)) + \eta(0)(n'_j(0) - n'_i(0)) = n'_i(0) \\ n'(T_h) = n'_i(T_h) + \eta'(T_h)(n_j(T_h) - n_i(T_h)) + \eta(T_h)(n'_j(T_h) - n'_i(T_h)) = n'_j(T_h) \end{cases} \quad (23)$$

由于 $n_j(0) - n_i(0) \neq 0$, $n_j(T_h) - n_i(T_h) \neq 0$, 则

$$\begin{cases} \eta(0) = 0, \eta(T_h) = 1 \\ \eta'(0) = 0, \eta'(T_h) = 0 \end{cases} \quad (24)$$

由于 $\eta(t)$ 可以为任何函数形式, 不妨设

$$\begin{cases} \eta(t) = C_1 \cos \frac{\pi}{2T}t + C_2 \sin \frac{\pi}{2T}t + C_3 \cos \frac{\pi}{T}t + C_4 \sin \frac{\pi}{T}t \\ \eta'(t) = -\frac{\pi}{2T}C_1 \sin \frac{\pi}{2T}t + \frac{\pi}{2T}C_2 \cos \frac{\pi}{2T}t - \frac{\pi}{T}C_3 \sin \frac{\pi}{T}t + \frac{\pi}{T}C_4 \cos \frac{\pi}{T}t \end{cases} \quad (25)$$

将式(24)代入式(25), 得

$$\begin{cases} C_1 + C_3 = 0 \\ C_2 - C_4 = 1 \\ C_2 + 2C_4 = 0 \\ C_1 + 2C_4 = 0 \end{cases} \quad (26)$$

对式(26)求解,可得: $C_1 = 0.5, C_2 = 0.5, C_3 = -0.5, C_4 = -0.25$ 。即

$$\eta(t) = 0.5 \cos \frac{\pi}{2T}t + 0.5 \sin \frac{\pi}{2T}t - 0.5 \cos \frac{\pi}{T}t - 0.25 \sin \frac{\pi}{T}t \quad (27)$$

3 仿真结果分析

设交接前采用比例导引律,即 $\dot{\theta}_M = N\dot{q}$,其中, $\dot{\theta}_M$ 为导弹弹道倾角速度, N 为比例系数, \dot{q} 为视线角速度。过载

$$n_y = \frac{v_M \dot{\theta}_M}{g} = \frac{N v_M \dot{q}}{g} \quad (28)$$

式中: v_M 为导弹瞬时速度; g 为重力加速度;取 $N = 3$ 。

交接后采用滑模变结构制导律^[16],即

$$\ddot{n}_y = \left((K+1) |\dot{r}_R| \dot{q} + \varepsilon_1 \frac{\dot{q}}{|\dot{q}| + \delta_1} \right) / g \quad (29)$$

式中: K 为比例系数; \dot{r}_R 为导弹、目标相对速度; ε_1, δ_1 为非负常数。取 $K = 2, \varepsilon_1 = 100, \delta_1 = 0.02$ 。

设导弹初始位置 (x_M, y_M) 为 $(0 \text{ m}, 1000 \text{ m})$, 弹道倾角 $\theta_M = 0^\circ$, 速度 $V_M = 800 \text{ m/s}$; 目标初始位置 (x_T, y_T) 为 $(80000 \text{ m}, 7000 \text{ m})$, 航迹倾角 $\theta_T = 0^\circ$, 速度 $V_T = 200 \text{ m/s}$; 进行中制导权移交时, 弹目距离 43 km , 位置精度差为 0.55 km , $n_{y_{\max}} = 30g, M = 10, t_0 = 45 \text{ s}$, 中制导指令发送周期 $T = 1.0 \text{ s}$, 仿真步长为 0.1 s 。

本文只讨论中制导权移交的情形,因此不考虑中末制导交接以及末制导。

分别对目标不机动、机动两种情况进行仿真,再分别对单机制导(无制导权移交)、中制导直接交接(无过渡交接)以及采用本文交接律进行交接时的导弹过载 n_y 曲线及弹目曲线进行仿真对比。

3.1 目标不机动

目标不机动情况下的仿真结果如图 2 所示。图 2a 中,在无中制导权移交且目标不机动的情况下,导弹过载较小,曲线平稳;图 2b 中,制导权直接交接造成导弹过载瞬间突变;图 2c 为采用本文方法,制导律不切换,仅有目标信息交接的导弹过载变化曲线;图 2d 为制导律及目标信息均采用交接律交接的导弹过载曲线,可以看出,过载的突变量已被显著转化到可接受范围内,而且交接期间过载比较平滑,图 2d 显示制导律切换可增大导弹过载变化,因此,设计制导律交接律确保过载的平滑变化是有必要的。

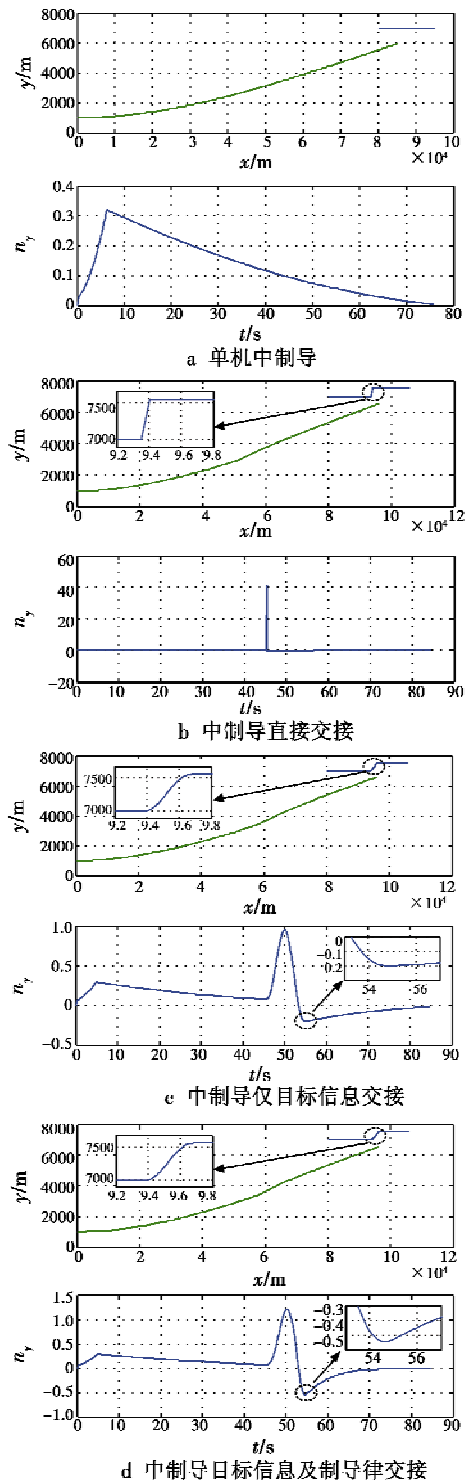


图 2 目标不机动情况下的仿真结果

Fig. 2 Simulation result when the target makes no maneuvering

3.2 目标机动

设在中制导期间,目标 + 做最大过载为 $0.5g$ 的正弦机动,仿真结果如图 3 所示。

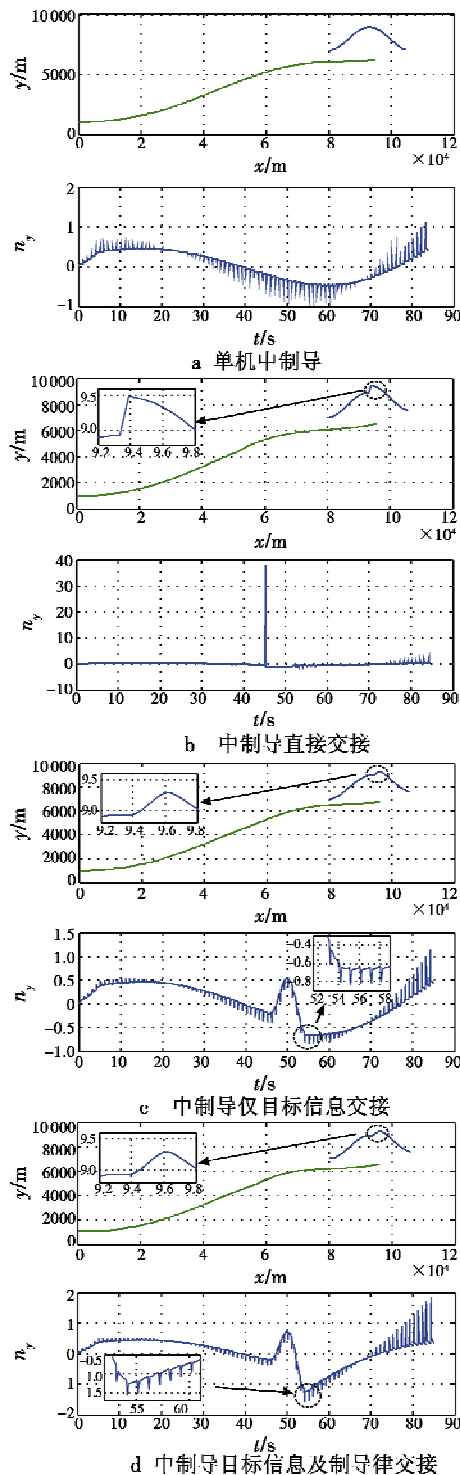


图3 目标正弦机动情况下的仿真结果

Fig. 3 Simulation result when the target makes sinusoidal maneuvering

该组实验为目标机动情形下,导弹制导权移交时的过载变化曲线。在制导权移交阶段,虚拟目标的运动是交接平台探测的目标运动叠加上虚拟的接近运动,导弹按照 V_T^i 保持不变、 V_{approach} 为交接载机设定的变化规律进行外推。目标机动造成的偏差由载机周期性地给导弹发送制导指令进行修正。图 3a 中过载的

小突变量正是导弹外推的目标信息与制导指令中目标信息不一致造成的,目标的机动过载较小,因此导弹过载的这些突变量也较小,且随着弹目距离的减小,呈增大趋势,这是因为弹目距离越近,目标同样的机动所引起的弹目视线角速率越大,修正过载也越大。

由图 3b 可以看出,在目标机动情况下,中制导权直接交接造成的导弹过载突变量远大于目标机动形成的突变;图 3c、图 3d 均为采用本文方法进行交接时的导弹过载曲线,与目标不机动情形下的仿真结果类似,交接造成的过载突变量已大幅减小,除修正过载外,其余时间导弹过载能够平稳过渡,而且制导律切换也引起了过载的变化。

4 结束语

中制导交接时目标信息及制导律的切换均能引起导弹过载的瞬时突变,影响交接段的弹道稳定。仿真实验表明,本文提出的空空导弹中制导权交接策略及方法,可将交接引起的导弹非正常过载突变转变为幅度较少的过载变化,并确保交接过程中过载平滑,有利于弹道稳定。

参考文献

- [1] 肖冰松,方洋旺,胡诗国,等.多机空战协同制导决策方法[J].系统工程与电子技术,2009,31(3):610-612. (XIAO B S, FANG Y W, HU S G, et al. Decision methods of cooperative guidance for multi-aircraft air combat[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(3):610-612.)
- [2] 付昭旺,于雷,李战武,等.双机协同导弹指令修正中制导技术[J].火力与指挥控制,2012,37(12):59-63. (FU Z W, YU L, LI Z W, et al. Research on command amendment guidance method of double-fighter cooperative missile guidance[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(12):59-63.)
- [3] 童明成,张凤霞,贺建良.网络环境下空中多平台联合攻击作战方式[J].电光与控制,2009,16(5):19-22. (TONG M C, ZHANG F X, HE J L. Aerial multi-platform joint-attack warfare modes in network environment [J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(5):19-22.)
- [4] 梁晓庚,王伯荣,余志峰,等.空空导弹制导控制系统设计[M].北京:国防工业出版社,2006:178-186. (LIANG X G, WANG B R, YU Z F, et al. Air-to-air missile guidance and control systems design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006:178-186.)
- [5] 张建伟,黄树彩,韩朝超.基于 Matlab 的比例导引弹道仿真分析[J].战术导弹技术,2009,21(3):60-64. (ZHANG J W, HUANG S C, HAN C C. Analysis of trajectory of proportional guidance based on Matlab[J]. Tac-

- tical Missile Technology, 2009, 21(3):60-64.)
- [6] 余亮,邢昌凤,王航宇,等. 编队协同防空作战中制导交接问题分析与建模[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(4):47-49. (YU L, XING C F, WANG H Y, et al. Analysis and modeling for guidance handover in cooperative air defense of ship formation[J]. Ship Electronic Engineering, 2008, 28(4):47-49.)
- [7] 赵永涛,胡云安,李静. 舰空导弹作战接力切换式制导交接方案设计[J]. 飞行力学, 2011, 29(1):50-53. (ZHAO Y T, HU Y A, LI J. Design of the relay switch guidance handover scheme for interception of the ship-air missile[J]. Flight Dynamics, 2011, 29(1):50-53.)
- [8] 乔良,王航宇,石章松,等. 编队协同防空制导交接仿真研究[J]. 指挥控制与仿真, 2009, 31(4):81-86. (QIAO L, WANG H Y, SHI Z S, et al. Simulation research for the guidance relaying zone of formation cooperative aerial defense[J]. Command Control & Simulation, 2009, 31(4):81-86.)
- [9] 费爱国,张陆游,刘刚,等. 基于粒子群拍卖混合算法的空空导弹制导权移交技术[J]. 宇航学报, 2013, 34(3):340-346. (FEI A G, ZHANG L Y, LIU G, et al. The technique for air-to-air missile guidance superiority handover based on particle swarm auction hybrid algorithm[J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(3):340-346.)
- [10] 余名哲,张友安,钱进. 基于遭遇点预测的比例导引与多平台接力制导交接律设计[J]. 海军航空工程学报, 2010, 25(3):255-258. (YU M Z, ZHANG Y A, QIAN J. Design of the proportional navigation based on hit point prediction and multi-platform relay-guidance transfer law[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2010, 25(3):255-258.)
- [11] 周志刚. 航空综合火力控制原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2008. (ZHOU Z G. Aviation integrated fire control system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.)
- [12] 何友,修建娟,张晶炜,等. 雷达数据处理及应用[M]. 2版. 北京:电子工业出版社, 2009:2-4. (HE Y, XIU J J, ZHANG J W, et al. Radar data processing with applications[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009:2-4.)
- [13] RICHARD S. Joining the dots: networked platforms extend air defense [J]. Jane's Navy International, 2005(12):26-30.
- [14] Defense Technical Information Center. Joint technical architecture[R]. Washington, U. S. DOD, 2001.
- [15] 周志刚. 机载火力控制系统分析[M]. 北京:国防工业出版社, 2008. (ZHOU Z G. Analysis for airborne fire control system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.)
- [16] 周荻. 寻的导弹新型导引规律[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. (ZHOU D. New guidance laws for homing missile[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.)

(上接第 26 页)

高了跟踪滤波的稳定性和鲁棒性。

参考文献

- [1] YANG W, FU Y W, ZHOU J Q, et al. Modified particle implementation of the PHD filter for multi-target tracking [C]//The 11th International Conference on Signal Processing, Beijing, 2012. doi:10.1109/ICOSP.2012.6491929.
- [2] 王晓,韩崇昭,连锋. 基于随机有限集的目标跟踪方法研究及最新进展[J]. 工程数学报, 2012, 38(10):3085-3089. (WANG X, HAN C Z, LIAN F. Survey of target tracking based on random finite set [J]. Chinese Journal of Engineering Mathematics, 2012, 38(10):3085-3089.)
- [3] 杨峰,王永齐,梁彦. 基于概率假设密度滤波方法的多目标跟踪技术综述[J]. 自动化学报, 2013, 39(11):1944-1956. (YANG F, WANG Y Q, LIANG Y. A survey of PHD filter based on multi-target tracking[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(11):1944-1956.)
- [4] GRANSTROM M, LUNDQUIST C, ORGUNER U. Extended target tracking using a Gaussian-mixture PHD filter [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(4):3268-3286.
- [5] 伊建君,张建秋,林青. Unsecented 卡尔曼滤波 - 卡尔曼滤波算法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(4):617-620. (YI J J, ZHANG J Q, LIN Q. Unsecented Kalman filter-Kalman filter algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(4):617-620.)
- [6] VO B N, MA W K. The Gaussian mixture probability hypothesis density filter [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(11):4091-4104.
- [7] 刘玉磊,冯新喜,鹿传国,等. 带渐消因子的 Quadrature 卡尔曼滤波[J]. 宇航学报, 2013, 37(8):1328-1338. (LIU Y L, FENG X X, LU C G, et al. A fading Quadrature Kalman filter for nonlinear systems[J]. Journal of Astronautics, 2013, 37(8):1328-1338.)
- [8] 巫春玲,韩崇昭. 平方根求积分卡尔曼滤波器[J]. 电子学报, 2009, 37(5):987-992. (WU C L, HAN C Z. Square root quadrature Kalman filter [J]. Journal of Electronics, 2009, 37(5):987-992.)